

Requested Patent: JP2001060572A

Title:

CLOSED LOOP CONTROL OF WAFER POLISHING IN A CHEMICAL MECHANICAL
POLISHING SYSTEM ;

Abstracted Patent: EP1066925 ;

Publication Date: 2001-01-10 ;

Inventor(s): ZUNIGA STEVEN M (US); BIRANG MANOOCHER (US) ;

Applicant(s): APPLIED MATERIALS INC (US) ;

Application Number: EP20000305803 20000710 ;

Priority Number(s): US19990143219P 19990709; US20000609426 20000705 ;

IPC Classification: B24B37/04 ; B24B49/16 ;

Equivalents:

ABSTRACT:

Techniques for polishing a wafer (10) include closed-loop control. The wafer can be held by a carrier head (100) having at least one chamber whose pressure is controlled to apply a downward force on the wafer. Thickness-related measurements of the wafer can be obtained during polishing and a thickness profile for the wafer is calculated based on the thickness-related measurements. The calculated thickness profile is compared to a target thickness profile. The pressure in at least one carrier head chamber is adjusted based on results of the comparison. The carrier head chamber pressures can be adjusted to control the amount of downward force applied to the wafer during polishing and/or to control the size of a loading area on the wafer against which the downward force is applied.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-60572

(P2001-60572A)

(43) 公開日 平成13年3月6日(2001.3.6)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	キーワード(参考)
H 0 1 L 21/304	6 2 2	H 0 1 L 21/304	6 2 2 R
			6 2 2 K
B 2 4 B 37/00		B 2 4 B 37/00	B

審査請求 未請求 請求項の数23 OL 外国語出願 (全 41 頁)

(21) 出願番号 特願2000-208748(P2000-208748)

(22) 出願日 平成12年7月10日(2000.7.10)

(31) 優先権主張番号 60/143219

(32) 優先日 平成11年7月9日(1999.7.9)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(31) 優先権主張番号 09/609426

(32) 優先日 平成12年7月5日(2000.7.5)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390040660

アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド

APPLIED MATERIALS, INCORPORATED

アメリカ合衆国 カリフォルニア州

95054 サンタ クララ パウアーズ アベニュー 3050

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外2名)

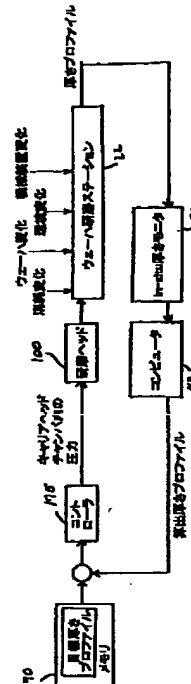
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 化学機械研磨装置でのウェーハ研磨の閉ループ制御

(57) 【要約】

【課題】 ウェーハ面の所望の平坦度すなわちトポグラフィを得ようCMPプロセスを制御する。

【解決手段】 ウェーハ研磨用の技術は閉ループ制御を含む。ウェーハ上に下向き力を加えるよう圧力を制御される少なくともひとつのチャンバを有するキャリアヘッド100により、ウェーハが保持され得る。ウェーハの厚さ関連測定値が研磨中に取得でき、厚さ関連測定値に基づき、ウェーハに対する厚さプロファイルが計算される。計算された厚さプロファイルは、目標厚さプロファイル170と比較される。比較結果に基づき、キャリアヘッドチャンバのうちの少なくともひとつのチャンバ内の圧力が調節される。キャリアヘッドチャンバ内圧力は、研磨中にウェーハへ加えられる下向き力の大きさを制御し、および/または、下向き力が加えられるウェーハ上の負荷領域の大きさを制御するよう調節され得る。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 ウェーハ上へ下向き力を加えるよう圧力が制御され得る少なくともひとつのチャンバを有するキャリアヘッドにより保持される前記ウェーハを研磨する方法であって：研磨中に前記ウェーハの厚さ関連測定値を得るステップと；前記厚さ関連測定値に基づき前記ウェーハに対する厚さプロファイルを計算するステップと前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較するステップと；前記比較結果に基づき少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節するステップと；を含む方法。

【請求項2】 更に、前記ウェーハを研磨面に対して保持するステップを含み、圧力を調節するステップは、研磨中に前記ウェーハと前記研磨面との間の圧力分布を変更する、請求項1記載の方法。

【請求項3】 更に、前記ウェーハを研磨面に対して保持するステップを含み、圧力を調節するステップは、研磨中に前記ウェーハが前記研磨面に対して押付けられる下向き力を変更する、請求項1記載の方法。

【請求項4】 前記キャリアヘッドは、制御可能な負荷領域において前記ウェーハへ圧力を供給する可撓膜を含み、圧力を調節するステップは、前記負荷領域においてウェーハへ加えられる前記圧力を制御するよう加圧可能なチャンバ内の圧力を調節するステップを含む、請求項1記載の方法。

【請求項5】 前記キャリアヘッドは、制御可能な負荷領域において前記ウェーハへ圧力を供給する膜を含み、圧力を調節するステップは、前記ウェーハが研磨面に対して押付けられる下向き力を制御するよう加圧可能なチャンバ内の圧力を調節するステップを含む、請求項1記載の方法。

【請求項6】 更に、前記ウェーハに関して、繰返して、厚さ関連測定値を得るステップと、厚さプロファイルを計算するステップと、前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較するステップと、前記キャリアヘッドの前記少なくともひとつのチャンバ内の圧力を調節するステップと、を含む、請求項1記載の方法。

【請求項7】 前記キャリアヘッドは、制御可能な負荷領域において前記ウェーハへ圧力を供給する膜を含み、前記ウェーハの中心部位が研磨不足であることを、前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較するステップが示す場合、少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力が、前記負荷領域の大きさを縮小するよう調節される、請求項1記載の方法。

【請求項8】 前記ウェーハの厚さ関連測定値を得るステップは、前記ウェーハ上の複数のサンプリングゾーンから反射される放射の強度を測定するステップを含む、請求項1記載の方法。

【請求項9】 前記目標厚さプロファイルは、前記研磨

プロセスにおいて特定の時間に対する理想の厚さプロファイルを表す、請求項1記載の方法。

【請求項10】 前記目標厚さプロファイルは、前記研磨プロセスにおいて特定の時間に対する予測される厚さプロファイルを表す、請求項1記載の方法。

【請求項11】 ウェーハ上へ下向き力を加えるよう圧力が制御され得る少なくともひとつのチャンバを有するキャリアヘッドにより保持される前記ウェーハを研磨する方法であって：前記ウェーハの厚さ関連測定値を得るステップと；前記厚さ関連測定値に基づき前記ウェーハに対する厚さプロファイルを計算するステップと；前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較するステップと；下向き力が加えられる前記ウェーハの領域の大きさを変更するよう、前記比較結果に基づき少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節するステップと；を含む方法。

【請求項12】 ウェーハ上へ下向き力を加えるよう圧力が制御され得る少なくともひとつのチャンバを有するキャリアヘッドにより保持される前記ウェーハを研磨する方法であって：前記キャリアヘッドに第1ウェーハを保持するステップと、前記第1ウェーハを研磨面に対して押付けるステップと；研磨中に前記第1ウェーハの厚さ関連測定値を得るステップと；前記厚さ関連測定値に基づき前記第1ウェーハに対する厚さプロファイルを計算するステップと；前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較するステップと；研磨中に下向き力が加えられる次に研磨されるウェーハの領域の大きさに影響を及ぼすよう、前記比較結果に基づき少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節するステップと；を含む方法。

【請求項13】 ウェーハ上の多数の部位へ独立して変更可能な圧力を加えることができる多数のチャンバを有するキャリアヘッドにより保持される前記ウェーハを研磨する方法であって：研磨中に前記ウェーハの厚さ関連測定値を得るステップと；前記厚さ関連測定値に基づき前記ウェーハの特定ゾーンに関連する前記キャリアヘッドチャンバのうちのひとつのチャンバ内圧力を調節するステップと；を含む方法。

【請求項14】 化学機械研磨装置であって：ウェーハ研磨面と；ウェーハを保持するためのキャリアヘッドであって、前記キャリアヘッドは、前記研磨面に対して前記ウェーハが研磨される際に前記ウェーハ上へ下向きの圧力を加えるよう圧力が制御され得る少なくともひとつのチャンバを含む、ウェーハを保持するためのキャリアヘッドと；研磨中に前記ウェーハの厚さ関連測定値を得るためのモニタと；目標厚さプロファイルを記憶するメモリと；プロセッサと；を備え、前記プロセッサは：

(a) 前記モニタにより得られる厚さ関連プロファイルに基づき前記ウェーハに対する厚さプロファイルを計算し；

(b) 前記計算される厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較し；

(c) 前記比較結果に基づき少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節する；ように構成される、化学機械研磨装置。

【請求項15】 前記キャリアヘッドは、制御可能な負荷領域において前記ウェーハへ圧力を供給する可撓膜を含み、前記プロセッサは、前記比較結果に基づき前記負荷領域において前記ウェーハへ加えられる前記圧力を制御するよう加圧可能なチャンバ内の圧力を調節するよう構成される、請求項14記載の装置。

【請求項16】 前記キャリアヘッドは、制御可能な負荷領域において前記ウェーハへ圧力を供給する膜を含み、前記プロセッサは、前記比較結果に基づき前記負荷領域の大きさを制御するよう加圧可能なチャンバ内の圧力を調節するよう構成される、請求項14記載の装置。

【請求項17】 前記メモリ内に記憶される前記目標厚さプロファイルは、前記研磨プロセスにおいて特定時間に対する理想の厚さプロファイルを表す、請求項14記載の装置。

【請求項18】 前記メモリ内に記憶される前記目標厚さプロファイルは、前記研磨プロセスにおいて特定時間に対する予測される厚さプロファイルを表す、請求項14記載の装置。

【請求項19】 前記モニタは、研磨中に前記ウェーハ上の複数のサンプリングゾーンから反射される放射の測定値を得よう編成される、請求項14記載の装置。

【請求項20】 コンピュータシステムに：研磨中にウェーハの厚さ関連測定値を取得させ；前記厚さ関連測定値に基づき前記ウェーハに対する厚さプロファイルを計算させ；前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較させ；研磨中に前記ウェーハ上への下向き力を調節するよう、前記比較結果に基づきキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節させる；コンピュータ実行可能命令を記憶するコンピュータ可読媒体を備える、アーティクル。

【請求項21】 前記コンピュータシステムに、制御可能な負荷領域においてウェーハへ可撓膜により加えられる圧力を制御するよう加圧可能なチャンバ内の圧力を調節させる命令を含む、請求項20記載のアーティクル。

【請求項22】 コンピュータシステムに、繰返し：研磨中に前記ウェーハに対する厚さ関連測定値を取得させ；前記厚さ関連測定値に基づき厚さプロファイルを計算させ；前記計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較させ；前記比較に基づきチャンバ内の前記圧力を調節させる；命令を含む、請求項20記載のアーティクル。

【請求項23】 コンピュータシステムに：ウェーハ上の多数の部位へ独立して変更可能な圧力を加えることができる多数のチャンバを有するキャリアヘッドにより保

持される前記ウェーハを研磨中に厚さ関連測定値を取得させ；前記厚さ関連測定値に基づき前記ウェーハの特定のゾーンに関連する前記キャリアヘッドチャンバのうちのひとつのチャンバ内の圧力を調節させる；コンピュータ実行可能命令を記憶するコンピュータ可読媒体を備える、アーティクル。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、一般に基板の化学機械研磨に関し、より詳細には、化学機械研磨装置におけるウェーハ研磨の閉ループ制御に関する。

【0002】

【従来の技術】集積回路は、普通には、基板、特にシリコンウェーハ上へ、導電体、半導体、または絶縁物の層の順次堆積により形成される。各層が堆積された後に、各層はエッチングされ回路フィーチャを生成する。一連の層が順次堆積されエッチングされるのに従い、基板の外側、つまり最上部表面、すなわち、基板露出面は、次第に平坦でなくなる。この非平坦面は、集積回路製造プロセスのフォトリソグラフィックステップにおいて問題を生ずる。従って、基板表面を周期的に平坦化するニーズがある。

【0003】化学機械研磨（CMP）は、容認された平坦化方法のひとつである。この平坦化方法は、普通には、基板がキャリアヘッドすなわち研磨ヘッド上に搭載される必要がある。基板露出面は、回転する研磨パッドに対して載置される。CMPプロセスの有効性は、その研磨レートにより、およびウェーハ表面の、結果として得られる仕上がり（微視的粗さの無いこと）と平坦度（巨視的トポグラフィ無いこと）により測定できる。研磨レート、仕上がり、および平坦度は、パッドとスラリの組合せ、ウェーハとパッド間の相対速度、およびパッドに対してウェーハを押付ける力により決められる。

【0004】CMPで再々起る問題は、「端効果（edge-effect）」、換言すれば、ウェーハの縁部がウェーハ中心部と異なるレートで研磨される性向である。端効果は、普通には、ウェーハの周辺、例えば、200ミリメートル（mm）ウェーハの最外部の3から15ミリメートルで、不均一の研磨を生じる。関連する問題は、「中心部スロー効果（center slow effect）」、換言すれば、ウェーハの中心部が研磨不足となる性向である。

【0005】他の要因もCMPプロセスにおける不均一性に寄与する。例えば、CMPプロセスは、研磨パッドの異なるロット間の差異、スラリのバッチでの変化、および時間経過で起るプロセスのドリフトに敏感である。加えて、CMPプロセスは、温度等の環境要因に依存して変化し得る。ウェーハとウェーハ上に堆積された膜の特定の状態もCMPプロセスでの変化に寄与する。同様に、CMP装置への機械的変化がCMPプロセスの均一性に影響し得る。CMPプロセスでの変化は、時間経過

で、例えば、研磨パッドの磨耗の結果として、ゆっくり起こり得る。他の変化が、スラリの新規のバッチ、または新規の研磨パッドが使用される際など、突然の変更の結果として起こり得る。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】現行技術を使用すると、ウェーハの厚さ動態を制御するようCMPプロセスにおける先に記載の変化を補正することは困難であった。特に、ウェーハ面の所望の平坦度すなわちトポグラフィを得るようCMPプロセスを制御することは困難であった。同様に、長期間にわたり多数のウェーハに対して反復可能な結果を得るようCMPプロセスを制御することは困難であった。

【0007】

【課題を解決するための手段】一般に、一局面によると、ウェーハを研磨する方法は、閉ループ制御を使用する。ウェーハ上に下向き力を加えるようチャンバの圧力が制御される少なくともひとつのチャンバを有するキャリアヘッドにより、ウェーハが保持され得る。本方法は、ウェーハの厚さ関連測定値を得ること、厚さ関連測定値に基づきウェーハのための厚さプロファイルを計算すること、とを含む。計算された厚さプロファイルは、目標厚さプロファイルと比較される。比較結果に基づき、少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力が調節される。

【0008】別の実施例では、研磨方法は、ウェーハの多数の部位へ独立して変更可能な圧力を加えることができる多数のチャンバを有するキャリアヘッドにより保持されるウェーハで使用され得る。方法は、研磨中にウェーハの厚さ関連測定値を得ること、そして厚さ関連測定値に基づきウェーハの特定ゾーンに関連するキャリアヘッドチャンバのうちのひとつのチャンバ内の圧力を調節することを含む。

【0009】化学機械研磨装置も開示される。装置は、ウェーハ研磨面と、ウェーハを保持するためのキャリアヘッドとを含む。キャリアヘッドは、ウェーハが研磨面に対して研磨される際にウェーハ上に下向き圧力を加えるよう圧力が制御され得る少なくともひとつのチャンバを含む。装置は、更に、研磨中にウェーハの厚さ関連測定値を得るためのモニタと、目標厚さプロファイルを記憶するメモリとを有する。プロセッサが：(a) モニタにより得られた厚さ関連プロファイルに基づきウェーハに対する厚さプロファイルを計算する；(b) 計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較する；(c) 比較結果に基づき少なくともひとつのキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節する；よう構成される。

【0010】一般に、チャンバ圧力は、特定ウェーハが研磨されている際に、リアルタイムで調節され得る。従って、厚さ測定値は、ウェーハの研磨と同時に取得可能

であり、チャンバ圧力は、研磨面からウェーハを除去することなく調節できる。別の実施例では、サンプルウェーハの厚さ関連測定値が取得され、目標プロファイルと比較でき、それによりチャンバ圧力の調節は、他のウェーハの研磨前か、または研磨中になされ得る。

【0011】種々の実施例では、以下の特長のひとつ以上が存在する。キャリアヘッドチャンバ圧力を調節することは、ウェーハと研磨面との間の圧力分布を変更できる。キャリアヘッドは、制御可能な負荷領域でウェーハへ圧力を供給する可撓膜を含むことができ、それにより、チャンバ圧力を調節することが、負荷領域でウェーハへ加えられる圧力を制御できる。例えば、ウェーハの中心部位が研磨不足であることを、計算された厚さプロファイルを目標準さプロファイルと比較することが示す場合、キャリアヘッドチャンバのうちのひとつのチャンバ内圧力が、負荷領域の大きさを縮小するよう調節され得る。

【0012】同様に、キャリアヘッドチャンバ圧力を調節することは、ウェーハが研磨面に対して押付けられる下向き力を変更できる。

【0013】ウェーハの厚さ関連測定値を得ることは、ウェーハ上の多数のサンプリングゾーンから反射された放射の強度を測定することを含み得る。目標厚さプロファイルは、研磨プロセスにおける特定の時間に対する、例えば、理想の厚さプロファイル、または予測される厚さプロファイルのいずれかを表すことができる。

【0014】加えて、厚さ関連測定値を得ることと、厚さプロファイルを計算することと、計算された厚さプロファイルを目標厚さプロファイルと比較することと、キャリアヘッドチャンバのうちの少なくともひとつのチャンバ内圧力を調節すること、とは、特定のウェーハプロセス中に多数回繰返されることができる。

【0015】種々の実施例は、以下の利点のひとつ以上を含むことができる。環境変化、ウェーハとスラリでの変化、CMP装置自体での変化など、ウェーハ研磨プロセスでの変化は、より均一でより平坦な表面を提供するよう補正され得る。同様に、ウェーハの異なる部位が研磨されるレートの変化は、より容易に補正され得る。実質的に平坦な表面を得るよう、そのような変化を補正することが望ましいことが多いであろうが、ウェーハの異なる部位が異なる厚さに研磨されるよう、キャリアヘッドチャンバ圧力を変化することが望ましい場合もあり得る。

【0016】他の特長および利点は、詳細な説明、図面、および特許請求の範囲から容易に明らかであろう。

【0017】

【発明の実施の形態】図1に示すように、多数の半導体ウェーハ10が化学機械研磨(CMP)装置20により研磨される。各ウェーハ10は、先立って形成されたひとつ以上の膜層を有することができる。研磨装置20

は、一連の研磨ステーション22と搬送ステーション23を含む。搬送ステーション23は、個々の基板10をローディング装置(図示せず)から受取ること、基板を洗浄すること、基板をキャリアヘッドへローディングすること、基板をキャリアヘッドから受取ること、基板を再洗浄すること、そして、最後に、ローディング装置へ基板を戻し搬送すること、を含む多数の機能を果たす。

【0018】各研磨ステーションは、その上に研磨パッド30が載置される回転可能なプラテン24を含む。研磨パッド30は、裏打層32とカバー層34を含むことができる(図2)。各プラテン24は、プラテン駆動モータ(図示せず)へ結合され得る。大抵の研磨プロセスのために、プラテン駆動モータはプラテン24を毎分30から200回転で回転させるが、より低いか又はより高い回転速度も使用できる。各研磨ステーションは、ウェーハを効果的に研磨するように研磨パッドの状態を維持するパッドコンディショニング装置28も含んでもよい。スラリ/リンス兼用アーム39が、スラリを研磨パッド30の表面へ供給できる。

【0019】回転可能なマルチヘッドカラセル60は、中心支柱62により支持され、その上でカラセル軸64のまわりに、カラセルモータ組立体(図示せず)により回転される。カラセル60は、4つのキャリアヘッド装置70を含む。中心支柱62は、カラセルモータが、カラセル軸64のまわりに、カラセル支持プレート66を回転させ、キャリアヘッド装置と該装置に取付けられた基板とを旋回させることを可能にする。キャリアヘッド装置の3つは、ウェーハを受取り保持し、研磨パッドに対して押付けることによりウェーハを研磨する。その間に、キャリアヘッド装置の1つが、搬送ステーション23からウェーハを受取り、搬送ステーション23へウェーハを引渡す。

【0020】少なくともひとつのステーションが、CMPプロセス中にウェーハについてのデータを取得し、厚さ関連情報を計算する能力のあるin-situレートモニタを含む。そのような厚さ測定技術のひとつは、1998年11月2日出願で、本発明の譲受人へ譲渡された米国特許出願第09/184,775号に開示されている。その出願は、ウェーハの厚さ関連測定値の半径方向プロファイル、すなわち直径方向走査を提供するように使用され得るin-situのリアルタイム測定装置と技術を記載しており、本明細書に引用して組込まれる。以下に説明するように、in-situ厚さモニタにより得られるウェーハの厚さ関連データは、CMP制御装置のためのフィードバックデータとして使用される。

【0021】in-situ厚さモニタ50の実施例のひとつを図2に示す。孔26がプラテン24に形成され、透明窓36が、孔の上にある研磨パッド30の一部に形成される。光学モニタ装置40が、孔26のほぼ直下でプ

ラテン24に固定され、プラテンと共に回転する。干渉を使用できる光学モニタ装置40は、レーザー等の光源44と検出器46とを含む。光源44は、光ビーム42を生成し、それは、透明窓36とスラリ38とを通過して伝播し、ウェーハ10の露出面上に当たる。光遮断器等の位置センサ160は、窓36がウェーハ10の近くにある場合を検知することによって使用できる。分光光度計を含む、他の技術が、ウェーハの厚さ関連測定値を得るために使用できる。

【0022】運転時、CMP装置20は、厚さモニタ50を使用でき、ウェーハ10の表面から除去された材料の量、薄膜層の残存厚さ、またはウェーハ面にわたる厚さの範囲、を決定する。更に、装置20は、ウェーハの不均一性の範囲、換言すれば、除去された厚さの平均で除去された厚さの標準偏差を割り、それに100%を乗じた値を求めることが可能である。加えて、装置20は、表面が平坦化された時期を求めることができる。

【0023】汎用プログラマブルデジタルコンピュータ48が、レーザー44と、検出器46と、位置センサ160とに接続される。コンピュータ48は、ウェーハがほぼ窓36の上にある際にレーザーを起動し、検出器からの強度測定値を記憶し、強度測定値を出力装置49上に表示し、強度測定値に基づき、初期厚さ、研磨レート、除去量、および残存厚さを計算し、研磨終点を検出するようプログラムされ得る。加えて、下記で非常に詳細に検討するように、コンピュータ48は、光学モニタ装置40から得られるフィードバックデータを使用して、研磨中にウェーハ10の背面へ加えられる圧力を調節するようプログラムされる。

【0024】ウェーハが研磨される場合、薄膜層の厚さは時間とともに変化する。検出器46からの信号出力も時間とともに変化する。検出器46の時間変化する出力は、in-situ反射率測定値軌跡(reflectance measurement trace)と称することができ、ウェーハ層の厚さを求めるのに使用できる。

【0025】一般に、光学モニタ装置40は、ウェーハ10上の多数のサンプリングゾーンから反射された放射の強度を測定する。各サンプリングゾーンの半径方向位置が計算され、強度測定値は半径方向範囲内へ区分される。特定の半径方向範囲に対して十分な数の強度測定値が蓄積された場合、その範囲に対する強度測定値からモデル関数が計算される。モデル関数は、初期厚さ、研磨レート、残存厚さ、および除去量を計算することに使用できる。加えて、ウェーハ上に堆積された膜層の平坦度測定値が計算され得る。更なる詳細は、先に記載の米国特許出願第09/184,775号に記載されている。代替技術も、ウェーハ厚さの半径方向プロファイルを得るために使用できる。

【0026】再び図1を参照すると、各キャリアヘッド装置は、キャリアヘッド100を含む。キャリア駆動シ

シャフト74がキャリアヘッド回転モータ76を各キャリアヘッド100へ結合し、それにより、各キャリアヘッドはそれ自体の軸のまわりに独立して回転できる。各キャリアヘッドは、関連するキャリア駆動のシャフトとモータとを有する。キャリアヘッド100は、幾つかの機械的機能を実行する。一般に、キャリアヘッドは、研磨操作中に、基板を研磨パッドに対して保持し、基板の背面にわたって下向きの圧力を分配し、トルクを駆動シャフトから基板へ転送し、そして、基板がキャリアヘッドの下から滑り出ないことを確実にする。

【0027】加えて、各キャリアヘッド100は、ウェーハの背面へ加えられる下向き圧力を変化させることを可能にする、制御可能な圧力と負荷の領域を有する。適切なキャリアヘッドは、1999年12月23日出願で、本発明の譲受人へ譲渡された米国特許出願第09,470,820号に記載されている。その出願の開示は、本明細書に引用して組込まれる。

【0028】先に記載の特許出願に開示されるように、そして図3に示すように、実施例のキャリアヘッド100は、ハウジング102と、ベース組立体104と、ジンバル機構106と、負荷チャンバ108と、保持リング110と、基板裏打組立体112と、を含み、基板裏打組立体112は、浮動上部チャンバ136、浮動下部チャンバ134、および外側チャンバ138という3つの加圧可能なチャンバを含む。

【0029】負荷チャンバ108は、ハウジング102とベース組立体104との間に配置され、荷重、換言すれば、下向きの圧力つまり重量をベース組立体104へ加える。第1圧力レギュレータ（図示せず）が負荷チャンバ108へ通路132により流体で結合されることができ、負荷チャンバ内の圧力とベース組立体104の垂直位置とを制御する。

【0030】ウェーハ裏打組立体112は、可撓内部膜116と、可撓外部膜118と、内部支持構造体120と、外部支持構造体130と、内部スペーシング122と、外部スペーシング132とを含む。可撓内部膜116は、ウェーハ10へ制御可能な領域で圧力を加える中央部分を含む。内側フラップ144により封止される、ベース組立体104と内部膜116との間の容積は、加圧可能な浮動下部チャンバ134を提供する。内側フラップ144と外側フラップ146とにより封止される、ベース組立体104と内部膜116との間の環状容積部は、加圧可能な浮動上部チャンバ136を画成する。

【0031】第2圧力レギュレータ（図示せず）が、ガスなどの流体を浮動上部チャンバ136内へ、または、そこから外へ向けるよう結合され得る。同様に、第3圧力レギュレータ（図示せず）が、流体を浮動下部チャンバ134内へ、または、そこから外へ向けるよう結合され得る。第2圧力レギュレータは、上部チャンバ内の圧

力と下部チャンバの垂直位置とを制御し、第3圧力レギュレータは、下部チャンバ134内の圧力を制御する。浮動上部チャンバ136内の圧力は、外部膜118の上部表面に対する内部膜116の接触領域を制御する。従って、第2と第3の圧力レギュレータは、圧力が加えられるウェーハ10の領域、換言すれば、負荷領域と、負荷領域における基板上的下向き力とを制御する。

【0032】内部膜116と外部膜118との間の封止される容積は、加圧可能な外側チャンバ138を画成する。第4圧力レギュレータ（図示せず）が、ガスのような流体を外側チャンバ138内へ又は外側チャンバ138から外へ向くよう通路140に結合され得る。第4圧力レギュレータは、外側チャンバ138内の圧力を制御する。

【0033】運転時、流体が、浮動下部チャンバ134内へ又は浮動下部チャンバ134から外へポンプ引きされ、外部膜118に対する、従って、ウェーハ10に対する、内部膜116の下向き圧力を制御する。流体が、浮動上部チャンバ136内へ又は浮動上部チャンバ136から外へポンプ引きされ、外部膜118に対する、内部膜116の接触領域を制御する。従って、キャリアヘッド100は、ウェーハ10へ加えられる負荷領域と圧力との両方を制御可能である。図4は、上部浮動チャンバ136内の圧力（P3）と外部膜118に対する内部膜116の接触領域との間の関係をグラフで示す。図4では、外側チャンバ138内の外部膜圧力（P1）は4psiである。グラフは、下部浮動チャンバ134内の内部膜圧力（P2）の、5psiから6.6psiの範囲にわたる、種々の値に対する接触領域を示す。

【0034】CMPプロセス中のウェーハ研磨の閉ループ制御を図5と6に示す。ウェーハ10は、キャリアヘッド100のひとつで保持され、初期パラメータをもつ以前に決定されたCMPプロセスを使用してステーション22で研磨される（150）。初期パラメータは、チャンバ108、134、136、と138内の圧力を含む。上記で検討したように、例えば、研磨パッドとスラリに関する消耗変化を含む他の要因が、CMPプロセスの動態に影響する。同様に、ウェーハでの変化、環境変化、および、CMP装置での変化がCMPプロセスの動態に影響を及ぼし、従って、ウェーハ面から除去される材料の量に影響する。普通、そのような変化は意識して装置に導入されるものではないので、制御するのが困難である。

【0035】ウェーハ10が研磨されるにつれて、特定の半径方向厚さプロファイルが結果として得られる。プロセス中の所定点で、例えば、研磨の開始から所定時間後、in-situ厚さモニタ50が、厚さ関連測定値をコンピュータ48へ供給する（152）。次に、コンピュータ48は、厚さモニタ50から取得された測定値に基づきウェーハ10に対する半径方向厚さプロファイルを計

算する(154)。換言すれば、ウェーハ中心部からウェーハ縁部までの多数点でのウェーハ厚さが計算される。幾つかの場合、計算されたウェーハ厚さは、各半径方向位置に対する平均厚さを表す可能性がある。

【0036】次に、計算された厚さプロファイルは、目標厚さプロファイルと比較される(156)。目標厚さプロファイルは、メモリ170、例えば、EEPROMに記憶でき、CMPプロセスにおける所定点で所望する理想のウェーハ厚さプロファイルを表し得る。代替として、目標厚さプロファイルは、CMPプロセスにおけるその点で予測される厚さプロファイルを表し得る。一実施例によると、目標プロファイルと計算されたプロファイルとは、各厚さプロファイルに相応する厚さ値間の差を計算することにより比較される。例えば、特定の半径方向位置に対する目標プロファイルの厚さ値が、同じ半径方向位置に対する計算された厚さプロファイルの相応する厚さ値から減算され得る。結果は、その各々がウェーハ10上の半径方向位置に相応し、ウェーハ上の特定の半径方向位置での目標厚さと計算された厚さとの間の不均衡を表す、一連の差値である。二つのプロファイルを比較することは、ハードウェアまたはソフトウェアで実行でき、例えば、コンピュータ48により実行できる。

【0037】目標厚さ値と計算された厚さ値との間の比較結果は、コントローラ175へ供給される。コントローラ175はコンピュータ48と分離して図示されているが、コントローラとコンピュータとは、ハードウェアおよび/またはソフトウェアを含み得る単一のコンピュータシステムの一部であってもよい。そのようなコンピュータシステムは、例えば、コンピュータ48とコントローラ175との機能を実行するよう構成されたひとつ以上の汎用または特定用途のプロセッサを含み得る。コンピュータシステムにこれらの機能を実行させるための命令は、読出専用メモリ(ROM)等の記憶媒体上に記憶できる。

【0038】比較結果を受取ることに応答して、コントローラ175は、結果をキャリアヘッド100のチャンバ108、134、136、138、のうちのひとつ以上のチャンバ内圧力を調節すること(158)に使用する。上記で検討したように、圧力は、ウェーハ上へ及ぼされるキャリアヘッド100の下向き圧力を変更し、および/または負荷領域を変更するよう調節できる。例えば、ウェーハ縁部がウェーハ中心部とは異なるレートで研磨されている場合、または、ウェーハ中心部が研磨不足である場合に、圧力が調節される必要があるかもしれない。特に、ウェーハ中心部が研磨不足である場合、チャンバ圧力は、負荷領域の半径を小さくするよう調節できる。換言すれば、ウェーハの中心部での圧力と研磨時間との積が、ウェーハ縁部近くの領域での積よりも大きく、それによって、研磨不足を補正する。チャンバ圧力

を調節した後に、ウェーハ10の研磨は、ウェーハが実質的に平坦化されたことをin-situ厚さモニタが示すまで、または別のCMP終了点に到達するまで、継続される(160)。

【0039】上記閉ループフィードバック制御は、特定のウェーハのCMP研磨中に1回以上実行され得る。換言すれば、キャリアヘッドチャンバ内の圧力は、CMPプロセス中に1回または多数回、厚さ関連測定値に基づき調節され得る。例えば、チャンバ圧力への閉ループ調節は、CMPプロセス中に、15秒毎に1回のような規則的な間隔で実行され得る。

【0040】幾つかの実施例では、各ウェーハが研磨される際に各ウェーハに対して閉ループ制御を実行することが望ましいであろう。他の状況では、ひとつ以上の試験ウェーハに対して閉ループ制御を実行することで充分であろう。試験ウェーハに対して得られたキャリアヘッドチャンバ圧力への調節が、ウェーハのバッチ全体のCMP研磨中に引き継ぎ使用され得る。

【0041】厚さプロファイルは、 $T(n)$ の時間期間後に取得でき、所望量の材料が除去されたか否かを決定する。所望量の材料がウェーハから除去されなかった場合、研磨時間は、1秒のような小単位の時間だけ延長され得る。プロセスは、所望量の材料が除去されるまで繰返し可能である。

【0042】一実施例では、サンプルウェーハが標準操作モードで研磨され、そこでは、浮動チャンバ134、136は加圧されず、外側チャンバ138が加圧され、ウェーハの背面全体へ均一な圧力を加える。そこで、サンプルウェーハが研磨され、所定時間後に、サンプルウェーハの多数の半径方向ゾーンの厚さ関連測定値が、取得され、半径方向厚さプロファイルへ変換される。厚さプロファイルは、目標プロファイル、例えば、実質的に平坦なプロファイルと比較され、差の厚さ Δt_n がウェーハ上の各半径方向ゾーンnに対して得られる。各差の厚さ Δt_n は、n番目のゾーンに対する測定された厚さと目標厚さとの間の差を表す。

【0043】ウェーハの測定された厚さに基づき、 $\text{\AA}/\text{psi}/\text{秒}$ の単位で表示され且つウェーハからの材料の除去の平均レートを示す除去係数(RF)が取得できる。チャンバ138内の外部膜圧力(P1)とチャンバ134内の内部膜圧力(P2)との間の圧力差に等しい差圧 ΔP が選定される。差圧 ΔP の典型的な例は、約1から数 psi の範囲である。ウェーハ上にN個の半径方向ゾーンを仮定し、1番目のゾーン($n=1$)がウェーハ中心部に最も近く、N番目のゾーンがウェーハ縁部に最も近いことを仮定すると、厚さプロファイルを修正するために規定された差圧 ΔP_n を使用して、次のウェーハの種々の部位が研磨されるべき継続時間 T_n を、以下のように計算できる：

$$T_n = [\Delta t_n / (\Delta P_n \cdot RF)] - [(T_{(n+1)}) \cdot \Delta P$$

$$\frac{(n+1)}{\Delta P_{(n)}} + (T_{(n+2)} \cdot \Delta P_{(n+2)} / \Delta P_{(n)}) + \dots + (T_{(N)} \cdot \Delta P_{(N)} / \Delta P_{(n)})]$$

圧力差が一定である状況では、先に記載の式は：

$$T_n = [\Delta t_n / (\Delta P_n \cdot RF)] - (T_{(n+1)} + T_{(n+2)} + \dots + T_{(N)})$$

に整理される。例えば、図8を参照すると、4つのゾーン(N=4)がある場合、

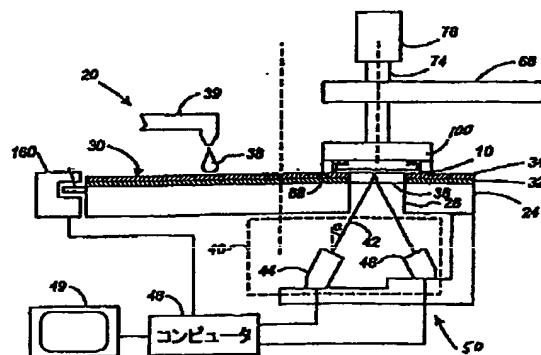
$$T_4 = [\Delta t_4 / (\Delta P_4 \cdot RF)]、T_3 = [\Delta t_3 / (\Delta P_3 \cdot RF)] - T_{(4)}、T_2 = [\Delta t_2 / (\Delta P_2 \cdot RF)] - (T_{(3)} + T_{(4)})、およびT_1 = [\Delta t_1 / (\Delta P_1 \cdot RF)] - (T_{(2)} + T_{(3)} + T_{(4)})。$$

上部浮動チャンバ136内の圧力(P3)は、負荷領域が継続時間T₁の間ウェーハ中心から第1ゾーン(n=1)の半径方向位置まで延び、負荷領域が継続時間T₂の間ウェーハ中心から第2ゾーン(n=2)の半径方向位置まで延び、負荷領域が継続時間T₃の間ウェーハ中心から第3ゾーン(n=3)の半径方向位置まで延び、負荷領域が継続時間T₄の間ウェーハ中心から第4ゾーン(n=4)の半径方向位置まで延びるよう、選定可能である。上部浮動チャンバ136内の圧力(P3)は、ほぼ以下の通りであり得る：

$P3 = ((P2 - P1) A_c + P1 A_1 - P2 A_2) / A_3$ 、ここで、負荷面積は、 $A_c = \pi (d_c)^2 / 4$ 、および、 $A_1 = \pi (d_1)^2 / 4$ 、 $A_2 = \pi (d_2)^2 / 4$ 、と、 $A_3 = \pi (d_3)^2 / 4$ である。図7に示すように、d₁、d₂、とd₃はそれぞれ、外側チャンバ138、下部浮動チャンバ134、と上部浮動チャンバに相応する直径である。新規の圧力と研磨時間を使用して、より平坦な表面を得ることができる。

【0044】幾つかの実施例では、キャリアヘッドは、ウェーハの多数の同心円部位へ独立して変更可能な圧力を加え得る多数の同心円チャンバを含むことができる。

【図2】



そのようなキャリアヘッドは、本明細書に引用してその全体を組込まれた、米国特許第5,964,653号に検討されている。研磨中、各チャンバ内の圧力は、そのチャンバに関連する半径方向ゾーンにおいて測定された研磨レート、または除去量に基づき調節され得る。例えば、ウェーハの縁部が基板の中心部より早く研磨されている、と光学モニタ装置が判断した場合、キャリアヘッドの最外部のチャンバへの圧力が研磨操作中に低減され得る。上記で説明した技術は、膜厚さをモニタし、測定された厚さの目標厚さプロファイルとの比較に基づき一つ以上のキャリアヘッドチャンバ内の圧力を調節することに使用できる。それは、研磨の均一性を著しく改善する。

【0045】本発明は、数多くの実施例について説明された。しかし、本発明は、図示され説明された実施例に限定されない。他の実施例は、先に記載の特許請求の範囲の範囲内である。

【図面の簡単な説明】

【図1】化学機械研磨装置の分解斜視図である。

【図2】本発明で使用する光学干渉計を含む実施例の化学機械研磨装置の側面図である。

【図3】本発明で使用する実施例のキャリアヘッドの断面略図である。

【図4】キャリアヘッドにおける膜の接触直径の値が、キャリアヘッドチャンバのうちのひとつのチャンバ内の圧力で変化する様子を図示するグラフである。

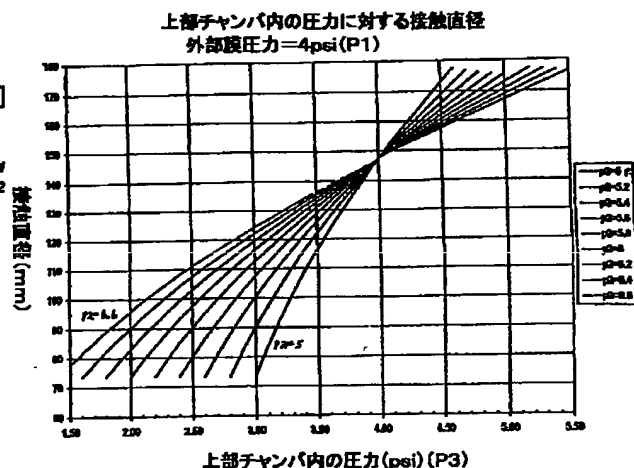
【図5】本発明による閉ループ制御ウェーハ研磨装置を示すブロック図である。

【図6】本発明による閉ループ制御ウェーハ研磨装置の方法のフローチャートである。

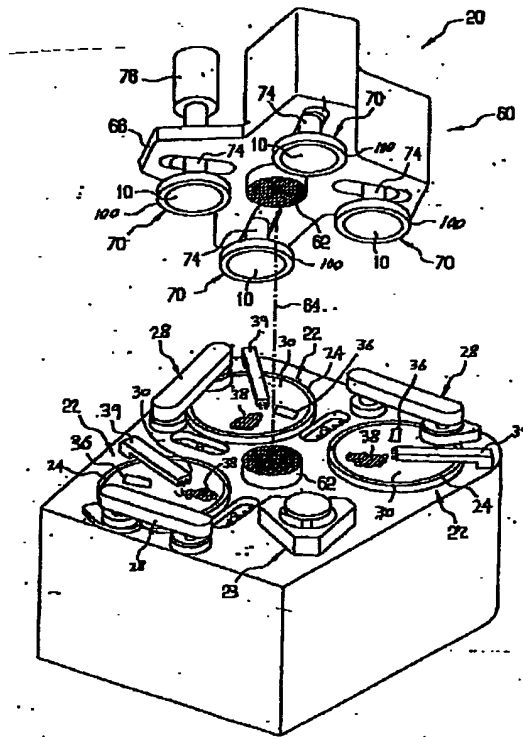
【図7】キャリアヘッドの種々の寸法を図示する。

【図8】ウェーハ上の実施例のゾーンを示す。

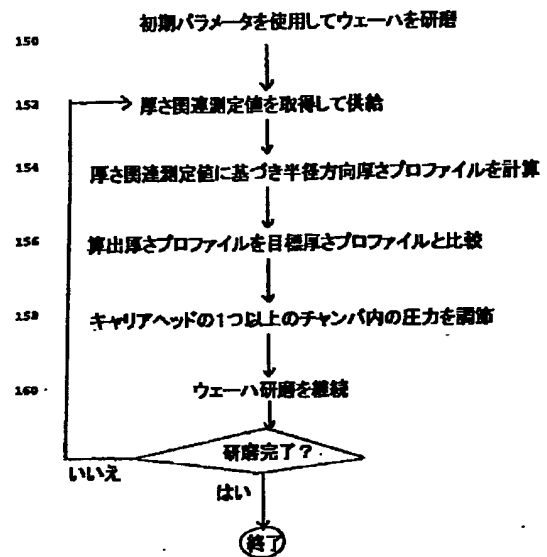
【図4】



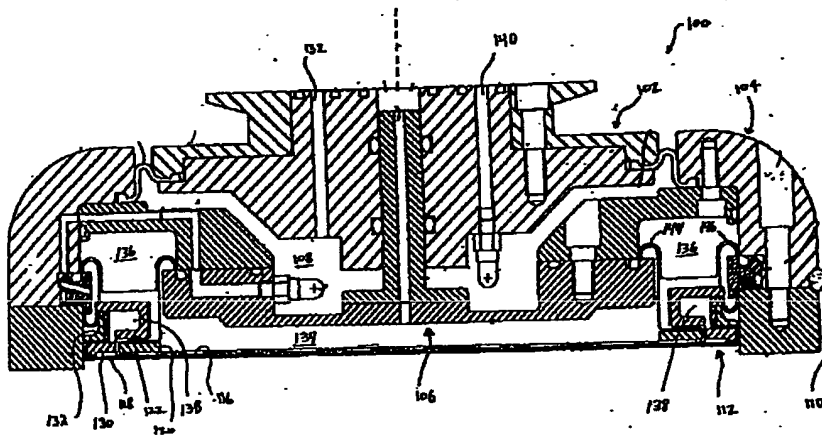
【図1】



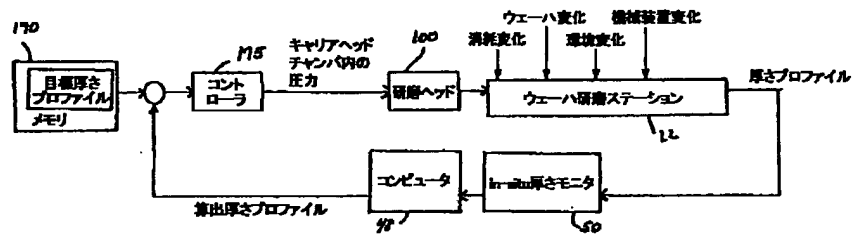
【図6】



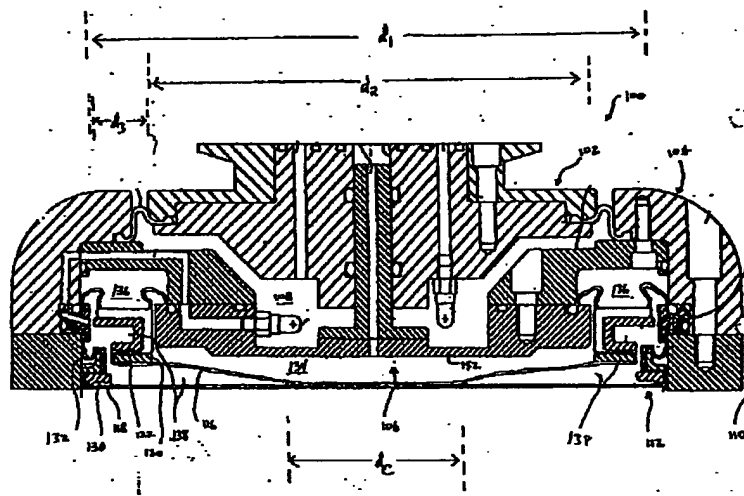
【図3】



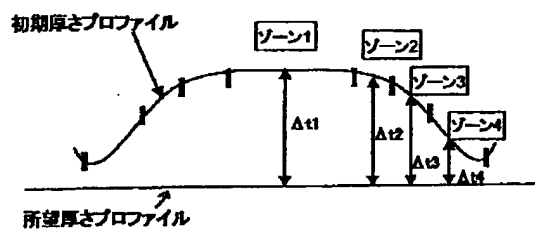
【図5】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 スティーヴン エム. ズニガ
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、
ソークエル、ロス ローブルス ロード
351

(72)発明者 マヌーチャ ビラング
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、
ロス ガトス、ファーヴル リッジ ロ
ード 18836

【外国語明細書】

1 Title of Invention

CLOSED-LOOP CONTROL OF WAFER POLISHING IN A
CHEMICAL MECHANICAL POLISHING SYSTEM

2 Claims

1. A method of polishing a wafer held by a carrier head having at least one chamber whose pressure can be controlled to apply a downward force on the wafer, the method comprising:
 - obtaining thickness-related measurements of the wafer during polishing;
 - calculating a thickness profile for the wafer based on the thickness-related measurements;
 - comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile; and
 - adjusting a pressure in at least one carrier head chamber based on results of the comparison.
2. The method of claim 1 further including holding the wafer against a polishing surface, wherein adjusting a pressure changes a pressure distribution between the wafer and the polishing surface during polishing.
3. The method of claim 1 further including holding the wafer against a polishing surface, wherein adjusting a pressure changes a downward force with which the wafer is pressed against the polishing surface during polishing.
4. The method of claim 1 wherein the carrier head includes a flexible membrane which provides a pressure to the wafer in a controllable loading area, and wherein adjusting a pressure includes adjusting a pressure in a pressurizable chamber to control the pressure applied to a wafer in the loading area.

5. The method of claim 1 wherein the carrier head includes a membrane which provides a pressure to the wafer in a controllable loading area, and wherein adjusting a pressure includes adjusting a pressure in a pressurizable chamber to control a downward force with which the wafer is pressed against a polishing surface.

6. The method of claim 1 further including repeatedly obtaining thickness-related measurements, calculating a thickness profile, comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile, and adjusting a pressure in the at least one chamber of the carrier head with respect to the wafer.

7. The method of claim 1 wherein the carrier head includes a membrane which provides a pressure to the wafer in a controllable loading area, and wherein, if comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile indicates that a center region of the wafer is being underpolished, then a pressure in at least one carrier head chamber is adjusted to reduce the size of the loading area.

8. The method of claim 1 wherein obtaining thickness-related measurements of the wafer includes measuring intensities of reflected radiation from a plurality of sampling zones on the wafer.

9. The method of claim 1 wherein the target thickness profile represents an ideal thickness profile for a particular time in the polishing process.

10. The method of claim 1 wherein the target thickness profile represents an expected thickness profile for a particular time in the polishing process.

11. A method of polishing a wafer held by a carrier head having at least one chamber whose pressure can be controlled to apply a downward force on the wafer, the method comprising:

obtaining thickness-related measurements of the wafer;

calculating a thickness profile for the wafer based on the thickness-related measurements;

comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile; and

adjusting the pressure in at least one carrier head chamber based on results of the comparison so as to change the size of an area of the wafer to which a downward force is applied.

12. A method of polishing a wafer held by a carrier head having at least one chamber whose pressure can be controlled to apply a downward force on the wafer, the method comprising:

holding a first wafer in the carrier head and pressing the first wafer against a polishing surface;

obtaining thickness-related measurements of the first wafer during polishing;

calculating a thickness profile for the first wafer based on the thickness-related measurements;

comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile; and
adjusting a pressure in at least one carrier head chamber based on results of
the comparison so as to affect the size of an area of a subsequently polished wafer to
which a downward force is applied during polishing.

13. A method of polishing a wafer held by a carrier head having multiple
chambers that can apply independently variable pressures to multiple regions of the
wafer, the method comprising:

obtaining thickness-related measurements of the wafer during polishing; and
adjusting a pressure in one of the carrier head chambers associated with a
particular zone of the wafer based on the thickness-related measurements.

14. A chemical mechanical polishing system comprising:

a wafer polishing surface;

a carrier head for holding a wafer, wherein the carrier head includes at least
one chamber whose pressure can be controlled to apply a downward pressure on the
wafer as it is polished against the polishing surface;

a monitor for obtaining thickness-related measurements of the wafer during
polishing;

memory that stores a target thickness profile; and

a processor configured to:

(a) calculate a thickness profile for the wafer based on a thickness-
related profile obtained by the monitor;

(b) compare the calculated thickness profile to a target thickness profile; and

(c) adjust a pressure in at least one carrier head chamber based on results of the comparison.

15. The system of claim 14 wherein the carrier head includes a flexible membrane which provides a pressure to the wafer in a controllable loading area, and wherein the processor is configured to adjust a pressure in a pressurizable chamber to control the pressure applied to the wafer in the loading area based on the comparison results.

16. The system of claim 14 wherein the carrier head includes a membrane which provides a pressure to the wafer in a controllable loading area, and wherein the processor is configured to adjust a pressure in a pressurizable chamber to control the size of the loading area based on the comparison results.

17. The system of claim 14 wherein the target thickness profile stored in the memory represents an ideal thickness profile for a particular time in the polishing process.

18. The system of claim 14 wherein the target thickness profile stored in the memory represents an expected thickness profile for a particular time in the polishing process.

19. The system of claim 14 wherein the monitor is arranged to obtain measurements of reflected radiation from a plurality of sampling zones on the wafer during polishing.

20. An article comprising a computer-readable medium that stores computer-executable instructions for causing a computer system to:

obtain thickness-related measurements of a wafer during polishing;

calculate a thickness profile for the wafer based on the thickness-related measurements;

compare the calculated thickness profile to a target thickness profile; and

adjust a pressure in a carrier head chamber based on results of the comparison to adjust a downward force on the wafer during polishing.

21. The article of claim 20 including instructions for causing the computer system to adjust a pressure in a pressurizable chamber to control a pressure applied by a flexible membrane to a wafer in a controllable loading area.

22. The article of claim 20 including instructions for causing the computer system to repeatedly:

obtain thickness-related measurements for the wafer during polishing;

calculate a thickness profile based on the thickness-related measurements;

compare the calculated thickness profile to a target thickness profile; and

adjust the pressure in the chamber based on the comparison.

23. An article comprising a computer-readable medium that stores computer-executable instructions for causing a computer system to:

obtain thickness-related measurements during polishing of a wafer held by a carrier head having multiple chambers that can apply independently variable pressures to multiple regions of the wafer; and

adjust a pressure in one of the carrier head chambers associated with a particular zone of the wafer based on the thickness-related measurements.

3 Detailed Description of Invention

BACKGROUND

The present invention relates generally to chemical mechanical polishing of substrates, and more particularly to closed-loop control of wafer polishing in a chemical mechanical polishing system.

Integrated circuits are typically formed on substrates, particularly silicon wafers, by the sequential deposition of conductor, semiconductor or insulator layers. After each layer is deposited, it is etched to create circuitry features. As a series of layers are sequentially deposited and etched, the outer or uppermost surface of the substrate, i.e., the exposed surface of the substrate, becomes increasingly nonplanar. This nonplanar surface presents problems in the photolithographic steps of the integrated circuit fabrication process. Therefore, there is a need to periodically planarize the substrate surface.

Chemical mechanical polishing (CMP) is one accepted method of planarization. This planarization method typically requires that the substrate be mounted on a carrier or polishing head. The exposed surface of the substrate is placed against a

rotating polishing pad. The effectiveness of a CMP process can be measured by its polishing rate, and by the resulting finish (absence of small-scale roughness) and flatness (absence of large-scale topography) of the wafer surface. The polishing rate, finish and flatness are determined by the pad and slurry combination, the relative speed between the wafer and pad, and the force pressing the wafer against the pad.

A recurring problem in CMP is the "edge-effect," in other words, the tendency of the wafer edge to be polished at a different rate than the wafer center. The edge effect typically results in non-uniform polishing at the wafer perimeter, for example, the outermost three to fifteen millimeters of a 200 millimeter (mm) wafer. A related problem is the "center slow effect," in other words, the tendency of the center of the wafer to be underpolished.

Other factors also contribute to non-uniformity in the CMP process. For example, CMP processes are sensitive to differences among polishing pad from different lots, variations in batches of slurry, and process drifts that occur over time. In addition, CMP processes may vary with depending on environmental factors, such as temperature. The particular condition of the wafer and films deposited on the wafer also contribute to variations in the CMP process. Similarly, mechanical changes to the CMP system can affect the uniformity of the CMP process. Variations in the CMP process may occur slowly over time, for example, as a result of wear to the polishing pad. Other variations may occur as a result of a sudden change, such as when a new batch of slurry or a new polishing pad is used.

Using current techniques, it has been difficult to compensate for the foregoing variations in CMP processes to control wafer thickness dynamics. In particular, it has

been difficult to control CMP processes to obtain a desired flatness or topography of the wafer surface. Similarly, it has been difficult to control CMP processes to obtain repeatable results for numerous wafers over a long period of time.

SUMMARY

In general, according to one aspect, a method of polishing a wafer uses closed-loop control. The wafer can be held by a carrier head having at least one chamber whose pressure is controlled to apply a downward force on the wafer. The method includes obtaining thickness-related measurements of the wafer and calculating a thickness profile for the wafer based on the thickness-related measurements. The calculated thickness profile is compared to a target thickness profile. The pressure in at least one carrier head chamber is adjusted based on results of the comparison.

In another implementation, a polishing method can be used with a wafer held by a carrier head having multiple chambers that can apply independently variable pressures to multiple regions of the wafer. The method includes obtaining thickness-related measurements of the wafer during polishing and adjusting a pressure in one of the carrier head chambers associated with a particular zone of the wafer based on the thickness-related measurements.

A chemical mechanical polishing system also is disclosed. The system includes a wafer polishing surface and a carrier head for holding a wafer. The carrier head includes at least one chamber whose pressure can be controlled to apply a downward pressure on the wafer as it is polished against the polishing surface. The system also has a monitor for obtaining thickness-related measurements of the wafer

during polishing and memory that stores a target thickness profile. A processor is configured to: (a) calculate a thickness profile for the wafer based on a thickness-related profile obtained by the monitor; (b) compare the calculated thickness profile to a target thickness profile; and (c) adjust a pressure in at least one carrier head chamber based on results of the comparison.

In general, the chamber pressures can be adjusted in real time as a particular wafer is being polished. Thus, thickness measurements can be obtained simultaneously with polishing of the wafer, and the chamber pressure can be adjusted without removing the wafer from the polishing surface. In other implementations, thickness-related measurements of a sample wafer can be obtained and compared to the target profile so that adjustments to the chamber pressures can be made prior to or during polishing of other wafers.

In various implementations, one or more of the following features may be present. Adjusting a carrier head chamber pressure can change the pressure distribution between the wafer and a polishing surface. The carrier head can include a flexible membrane which provides a pressure to the wafer in a controllable loading area so that adjusting a chamber pressure can control the pressure applied to a wafer in the loading area. For example, if comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile indicates that a center region of the wafer is being underpolished, then a pressure in one of the carrier head chambers can be adjusted to reduce the size of the loading area.

Similarly, adjusting a carrier head chamber pressure can change a downward force with which the wafer is pressed against the polishing surface.

Obtaining thickness-related measurements of the wafer can include measuring intensities of reflected radiation from multiple sampling zones on the wafer. The target thickness profile can represent, for example, either an ideal thickness profile or an expected thickness profile for a particular time in the polishing process.

Additionally, obtaining thickness-related measurements, calculating a thickness profile, comparing the calculated thickness profile to a target thickness profile, and adjusting a pressure in at least one of the carrier head chambers can be repeated multiple times during processing of a particular wafer.

Various implementations can include one or more of the following advantages. Variations in the wafer polishing process, such as environmental variations, variations in wafers and slurries, and variations in the CMP apparatus itself can be compensated for to provide a more uniform and more planar surface. Similarly, variations in the rate at which different regions of wafers are polished can be compensated for more easily. Although it will often be desirable to compensate for such variations so as to obtain a substantially planar surface, it may be desirable in some cases to vary the carrier head chamber pressures so that different regions of the wafer are polished to different thicknesses.

Other features and advantages will be readily apparent from the detailed description, drawings and claims.

DETAILED DESCRIPTION

As shown in FIG. 1, multiple semiconductor wafers 10 are polished by a chemical mechanical polishing (CMP) apparatus 20. Each wafer 10 may have one or more previously-formed films of layers. The polishing apparatus 20 includes a series of polishing stations 22 and a transfer station 23. The transfer station 23 serves multiple functions, including receiving individual wafers 10 from a loading apparatus (not shown), washing the wafers, loading the wafers into carrier heads, receiving the wafers from the carrier heads, washing the wafers again, and finally, transferring the wafers back to the loading apparatus.

Each polishing station includes a rotatable platen 24 on which is placed a polishing pad 30. The polishing pads 30 can include a backing layer 32 and a covering layer 34 (FIG. 2). Each platen 24 can be connected to a platen drive motor (not shown). For most polishing processes, the platen drive motor rotates platen 24 at thirty to two hundred revolutions per minute, although lower or higher rotational speeds may be used. Each polishing station may also include a pad conditioner apparatus 28 to maintain the condition of the polishing pad so that it will effectively polish wafers. Combined slurry/rinse arms 39 can supply slurry to the surface of the polishing pads 30.

A rotatable multi-head carousel 60 is supported by a center post 62 and is rotated thereon about a carousel axis 64 by a carousel motor assembly (not shown). The carousel 60 includes four carrier head systems 70. The center post 62 allows the carousel motor to rotate carousel support plate 66 and to orbit the carrier head systems and the wafers attached thereto about the carousel axis 64. Three of the carrier head systems receive and hold wafers, and polish them by pressing them against the polishing pads. Meanwhile, one of the carrier head systems receives a wafer from and delivers a wafer to transfer station 23.

At least one of the stations includes an *in situ* rate monitor that is capable of obtaining data and calculating thickness-related information about the wafer during the CMP process. One such thickness measuring technique is disclosed in U.S. Patent Application Serial No. 09/184,775, filed on November 2, 1998, and assigned to the assignee of the present invention. That application, which describes an *in situ*, real-time measuring apparatus and technique that can be used to provide a radial profile or diameter scan of thickness-related measurements of the wafer, is incorporated herein by

reference. As described below, the wafer thickness-related data obtained by the *in situ* thickness monitor is used as feedback data for a CMP control system.

One implementation of an *in situ* thickness monitor 50 is shown in FIG. 2. A hole 26 is formed in the platen 24, and a transparent window 36 is formed in a portion of the polishing pad 30 overlying the hole. An optical monitoring system 40 is secured to the platen 24 generally beneath the hole 26 and rotates with the platen. The optical monitoring system 40, which can use interferometry, includes a light source 44, such as a laser, and a detector 46. The light source 44 generates a light beam 42 which propagates through the transparent window 36 and slurry 38 to impinge upon the exposed surface of the wafer 10. A position sensor 160, such as an optical interrupter, can be used to sense when the window 36 is near the wafer 10. Other techniques, including spectrophotometry, can be used to obtain thickness-related measurements of the wafer.

In operation, the CMP apparatus 20 can use the thickness monitor 50 to determine the amount of material that has been removed from the surface of the wafer 10, the remaining thickness of a thin film layer, or the range of thicknesses across the wafer surface. The apparatus 20 also can determine the within wafer non-uniformity, in other words, the standard deviation in the thicknesses removed divided by the average thickness removed, multiplied by 100%. Additionally, the apparatus 20 can determine when the surface has become planarized.

A general purpose programmable digital computer 48 is coupled to the laser 44, the detector 46 and the position sensor 160. The computer 48 can be programmed to activate the laser when the wafer generally overlies the window 36, to store intensity measurements from the detector, to display the intensity measurements on an output

device 49, to calculate the initial thickness, polishing rate, amount removed and remaining thickness based on the intensity measurements, and to detect the polishing endpoint. Additionally, as discussed in greater detail below, the computer 48 is programmed to use the feedback data obtained from the optical monitoring system 40 to adjust the pressure(s) applied to the back surface of the wafer 10 during polishing.

Because the thickness of the thin film layer varies with time as the wafer is polished, the signal output from the detector 46 also varies with time. The time varying output of the detector 46 can be referred to as an *in-situ* reflectance measurement trace and can be used to determine the thickness of the wafer layers.

In general, the optical monitoring system 40 measures the intensity of reflected radiation from multiple sampling zones on the wafer 10. The radial position of each sampling zone is calculated, and the intensity measurements are sorted into radial ranges. Once a sufficient number of intensity measurements have been accumulated for a particular radial range, a model function is calculated from the intensity measurements for that range. The model function can be used to calculate the initial thickness, polishing rate, remaining thickness, and amount removed. In addition, a measure of the flatness of a film deposited on the wafer can be calculated. Further details are described in the previously-mentioned U.S. Patent Application Serial No. 09/184,775. Alternative techniques also can be used to obtain a radial profile of the wafer thickness.

Referring again to FIG. 1, each carrier head system includes a carrier head 100. A carrier drive shaft 74 connects a carrier head rotation motor 76 to each carrier head 100 so that each carrier head can independently rotate about its own axis. Each carrier head has an associated carrier drive shaft and motor. The carrier head 100

performs several mechanical functions. Generally, the carrier head holds the substrate against the polishing pad, distributes a downward pressure across the back surface of the substrate, transfers torque from the drive shaft to the substrate, and ensures that the substrate does not slip out from beneath the carrier head during polishing operations.

Additionally, each of the carrier heads 100 has a controllable pressure and loading area which allows the downward pressure applied to the back of the wafer to be varied. A suitable carrier head is described in U.S. Patent Application Serial No. 09,470,820, filed on December 23, 1999 and assigned to the assignee of the present invention. The disclosure of that application is incorporated herein by reference.

As disclosed in the foregoing patent application and as shown in FIG. 3, an exemplary carrier head 100 includes a housing 102, a base assembly 104, a gimbal mechanism 106, a loading chamber 108, a retaining ring 110, and a substrate backing assembly 112 which includes three pressurizable chambers, such as a floating upper chamber 136, a floating lower chamber 134, and an outer chamber 138.

The loading chamber 108 is located between the housing 102 and the base assembly 104 to apply a load, in other words, a downward pressure or weight, to the base assembly 104. A first pressure regulator (not shown) can be fluidly connected to the loading chamber 108 by a passage 132 to control the pressure in the loading chamber and the vertical position of base assembly 104.

A wafer backing assembly 112 includes a flexible internal membrane 116, a flexible external membrane 118, an internal support structure 120, an external support structure 130, an internal spacer ring 122 and an external spacer ring 132. The flexible internal membrane 116 includes a central portion which applies pressure to the wafer 10

in a controllable area. The volume between the base assembly 104 and the internal membrane 116 that is sealed by an inner flap 144 provides the pressurizable floating lower chamber 134. The annular volume between the base assembly 104 and the internal membrane 116 that is sealed by the inner flap 144 and outer flap 146 defines the pressurizable floating upper chamber 136.

A second pressure regulator (not shown) can be connected to direct fluid such as a gas into or out of the floating upper chamber 136. Similarly, a third pressure regulator (not shown) can be connected to direct a fluid into or out of the floating lower chamber 134. The second pressure regulator controls the pressure in the upper chamber and the vertical position of the lower chamber, and the third pressure regulator controls the pressure in the lower chamber 134. The pressure in the floating upper chamber 136 controls the contact area of the internal membrane 116 against a top surface of the external membrane 118. Thus, the second and third pressure regulators control the area of the wafer 10 against which pressure is applied, in other words the loading area, and the downward force on the substrate in the loading area.

The sealed volume between the internal membrane 116 and the external membrane 118 defines a pressurizable outer chamber 138. A fourth pressure regulator (not shown) can be connected to passage 140 to direct fluid such as a gas into or out of the outer chamber 138. The fourth pressure regulator controls the pressure in the outer chamber 138.

In operation, fluid is pumped into or out of the floating lower chamber 134 to control the downward pressure of the internal membrane 116 against the external membrane 118 and, therefore, against the wafer 10. Fluid is pumped into or out of the

floating upper chamber 136 to control the contact area of the internal membrane 116 against the external membrane 118. Thus, the carrier head 100 is able to control both the loading area and the pressure applied to the wafer 10. FIG. 4 illustrates graphically a relationship between the pressure (P3) in the upper floating chamber 136 and the contact area of the internal membrane 116 against the external membrane 118. In FIG. 4, the external membrane pressure (P1) in the outer chamber 138 is 4 psi. The graph illustrates the contact area for various values of the internal membrane pressure (P2) in the lower floating chamber 134, ranging from 5 psi to 6.6 psi.

Closed-loop control of wafer polishing during the CMP process is illustrated by FIGS. 5 and 6. A wafer 10 is held by one of the carrier heads 100 and polished 150 at a station 22 using a previously determined CMP process with initial parameters. The initial parameters include the pressures in the chambers 108, 134, 136 and 138. As discussed above, other factors, including consumable variations related, for example, to the polishing pad and slurry affect the dynamics of the CMP process. Similarly, variations in the wafer, environmental variations and variations in the CMP system, affect the dynamics of the CMP process and, therefore, affect the amount of material removed from the wafer surface. Typically, such variations are not intentionally introduced into the system and are difficult to control.

As the wafer 10 is polished, a particular radial thickness profile results. At a predetermined point during the process, for example, after a predetermined time since commencement of the polishing, the *in situ* thickness monitor 50 provides 152 thickness-related measurements to the computer 48. The computer 48 then calculates 154 a radial thickness profile for the wafer 10 based on the measurements obtained from the thickness

monitor 50. In other words, the wafer thickness at multiple positions from the wafer center to the wafer edge is calculated. In some cases, the calculated wafer thicknesses may represent average thicknesses for each radial position.

Next, the calculated thickness profile is compared 156 to a target thickness profile. The target thickness profile can be stored in memory 170, for example, EEPROM and can represent an ideal wafer thickness profile which is desired at the predetermined point in the CMP process. Alternatively, the target thickness profile can represent a thickness profile that is expected at that point in the CMP process. According to one implementation, the target profile and the calculated profile are compared by calculating a difference between the corresponding thickness values for each of the thickness profiles. For example, the thickness value in the target profile for a particular radial position can be subtracted from the corresponding thickness value in the calculated thickness profile for the same radial position. The result is a series of difference values each of which corresponds to a radial position on the wafer 10 and which represents the disparity between the target thickness and the calculated thickness at the particular radial position on the wafer. Comparing the two profiles can be performed either in hardware or software and may be performed, for example, by the computer 48.

The result of the comparison between the target thickness values and the calculated thickness values is provided to a controller 175. Although the controller 175 is illustrated separately from the computer 48, the controller and computer can be part of a single computer system that may include hardware and/or software. Such a computer system can include, for example, one or more general purpose or special purpose processors configured to perform the functions of the computer 48 and the controller 175.

Instructions for causing the computer system to perform those functions can be stored on a storage medium such as read-only-memory (ROM).

In response to receiving the comparison results, the controller 175 uses the results to adjust 158 the pressure in one or more of the chambers 108, 134, 136, 138 of the carrier head 100. As discussed above, the pressures can be adjusted to change the downward pressure of the carrier head 100 exerted on the wafer and/or to change the loading area. For example, the pressures may need to be adjusted if the wafer edge is being polished at a different rate than the wafer center or if the wafer center is being underpolished. In particular, if the center of the wafer is being underpolished, the chamber pressures can be adjusted to reduce the radius of the loading area. In other words, the product of the pressure and polishing time at the center of the wafer is greater than at areas near the wafer edge, thereby compensating for the underpolishing. After adjusting the chamber pressures, polishing of the wafer 10 continues 160 until the *in situ* thickness monitor indicates that the wafer is substantially planarized or until some other CMP end-point is reached.

The closed-loop feedback control illustrated above can be performed one or more times during CMP polishing of a particular wafer. In other words, the pressures in the carrier head chambers can be adjusted based on thickness-related measurements once or multiple times during the CMP process. For example, closed-loop adjustments to the chamber pressures can be performed at some regular interval, such as once every fifteen seconds, during the CMP process.

In some implementations, it may be desirable to perform the closed-loop control for each wafer as it is polished. In other situations, it will be sufficient to perform

the closed-loop control for one or more test wafers. The adjustments to the carrier head chamber pressures obtained for the test wafers can subsequently be used during CMP polishing of an entire batch of wafers.

The thickness-profile can be obtained after a period of time $T(n)$ to determine whether the desired amount of material was removed. If the desired amount of material was not removed from the wafer, then the polishing time can be extended by a small unit of time, such as one second. The process can be repeated until the desired amount of material has been removed.

In one implementation, a sample wafer is polished in a standard operating mode in which the floating chambers 134, 136 are depressurized, and the outer chamber 138 is pressurized to apply a uniform pressure to the entire backside of the wafer. The sample wafer is then polished and, after a predetermined period of time, thickness-related measurements of multiple radial zones of the sample wafer are obtained and converted to a radial thickness profile. The thickness profile is compared to a target profile, for example, a substantially flat profile, and a differential thickness Δt_n is obtained for each radial zone n on the wafer. Each differential thickness Δt_n represents the difference between the measured thickness and the target thickness for the n^{th} zone.

Based on the measured thicknesses of the wafer, a removal factor (RF) expressed in units of $\text{\AA}/\text{psi}/\text{second}$ and indicating an average rate of removal of material from the wafer can be obtained. A differential pressure ΔP , which equals the difference in pressure between the external membrane pressure ($P1$) in the chamber 138 and the internal membrane pressure ($P2$) in the chamber 134, is selected. Typical examples of the differential pressure ΔP are in the range of about one to several psi. Assuming N

radial zones on the wafer and assuming that the first zone ($n=1$) is closest to the wafer center and the N^{th} zone is closest to the wafer edge, the durations T_n for which the various regions of subsequent wafers should be polished using the specified pressure differentials ΔP_n to correct the thickness profile can be calculated as follows:

$$T_n = [\Delta t_w / (\Delta P_n \cdot RF)] - [(T_{(n+1)} \cdot \Delta P_{(n+1)} / \Delta P_{(n)}) + (T_{(n+2)} \cdot \Delta P_{(n+2)} / \Delta P_{(n)}) + \dots + (T_{(N)} \cdot \Delta P_{(N)} / \Delta P_{(n)})].$$

In situations where the pressure differential is constant, the foregoing equation reduces to:

$$T_n = [\Delta t_w / (\Delta P_n \cdot RF)] - (T_{(n+1)} + T_{(n+2)} + \dots + T_{(N)}).$$

For example, referring to FIG. 8, if there are four zones ($N=4$), then

$$T_4 = [\Delta t_4 / (\Delta P_4 \cdot RF)],$$

$$T_3 = [\Delta t_3 / (\Delta P_3 \cdot RF)] - T_{(4)},$$

$$T_2 = [\Delta t_2 / (\Delta P_2 \cdot RF)] - (T_{(3)} + T_{(4)}), \text{ and}$$

$$T_1 = [\Delta t_1 / (\Delta P_1 \cdot RF)] - (T_{(2)} + T_{(3)} + T_{(4)}).$$

The pressure (P_3) in the upper floating chamber 136 can then be selected so that the loading area extends from the wafer center to the radial position of the first zone ($n=1$) for a duration T_1 , the loading area extends from the wafer center to the radial position of the second zone ($n=2$) for a duration T_2 , the loading area extends from the wafer center to the radial position of the third zone ($n=3$) for a duration T_3 , and the loading area extends from the wafer center to the radial position of the fourth zone ($n=4$) for a duration T_4 . The pressure (P_3) in the upper floating chamber 136 can be approximated as follows:

$$P_3 = ((P_2 - P_1)A_C + P_1A_1 - P_2A_2) / A_3,$$

where the loading area $A_C = \pi(d_C)^2/4$, and $A_1 = \pi(d_1)^2/4$, $A_2 = \pi(d_2)^2/4$, and $A_3 = \pi(d_3)^2/4$. As shown in FIG. 7, d_1 , d_2 and d_3 are diameters corresponding, respectively, to the outer chamber 138, the lower floating chamber 134 and the upper floating chamber. Using the new pressures and polishing times, a more planar surface can be obtained.

In some implementations, the carrier head can include multiple concentric chambers that can apply independently variable pressures to multiple concentric regions of the wafer. Such a carrier head is discussed in U.S. 5,964,653, incorporated herein by reference in its entirety. During polishing, the pressure in each chamber can be adjusted based on the measured polishing rate or amount removed in the radial zone associated with that chamber. For example, if the optical monitoring system determines that the edge of the wafer is being polished faster than the center of the substrate, the pressure to the outermost chamber of the carrier head can be reduced during the polishing operation. The techniques described above can be used to monitor a film thickness and to adjust a pressure in one or more of the carrier head chambers based on a comparison of the measured thicknesses with a target thickness profile. That can significantly improve the polishing uniformity.

The invention has been described in terms of a number of implementations. The invention, however, is not limited to the implementations depicted and described. Other implementations are within the scope of the following claims.

4 Brief Description of Drawings

FIG. 1 is an exploded perspective view of a chemical mechanical polishing apparatus.

FIG. 2 is a side view of an exemplary chemical mechanical polishing apparatus including an optical interferometer for use in the invention.

FIG. 3 is a schematic cross-sectional view of an exemplary carrier head for use in the invention.

FIG. 4 is a graph illustrating how the value of a contact diameter of a membrane in the carrier head varies with the pressure in one of the carrier head chambers.

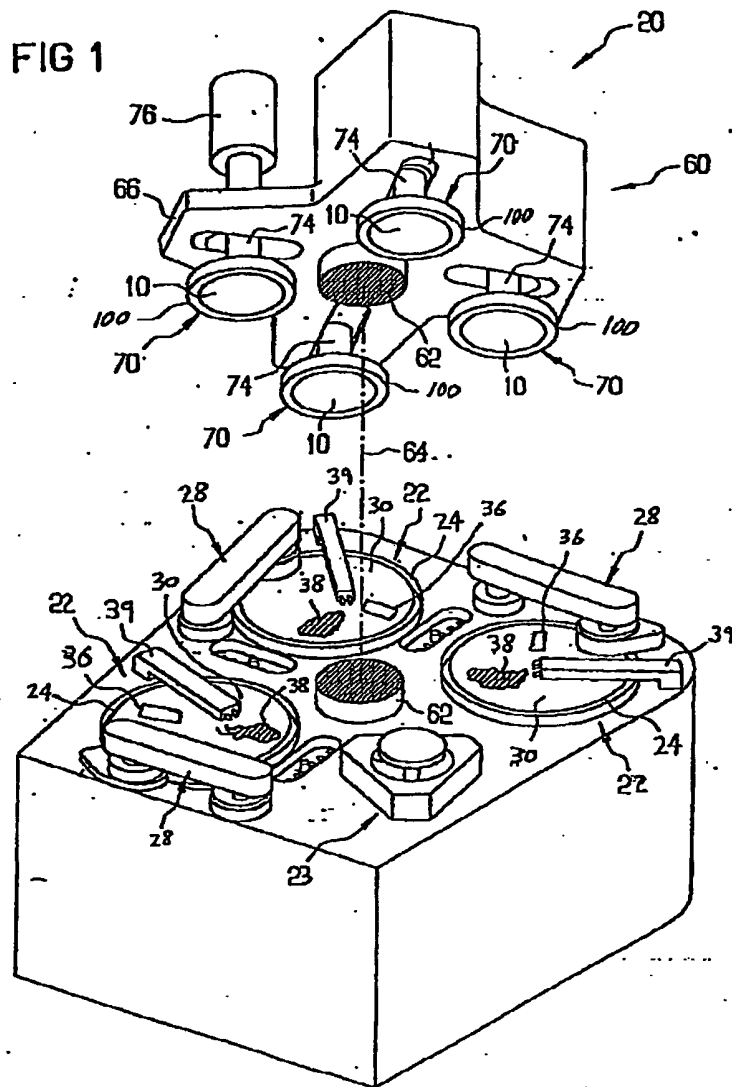
FIG. 5 is a block diagram showing a closed-loop control wafer polishing system according to the invention.

FIG. 6 is a flow chart of a method of closed-loop control wafer polishing according to the invention.

FIG. 7 illustrates various dimensions of the carrier head.

FIG. 8 shows exemplary zones on a wafer.

FIG 1



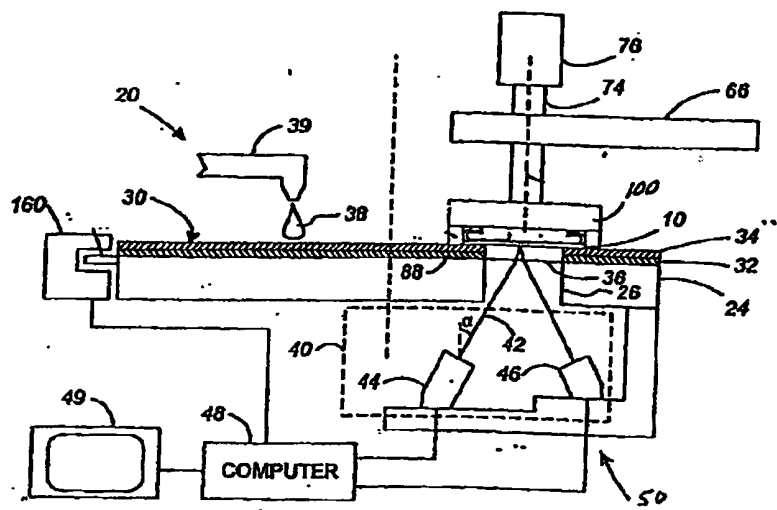
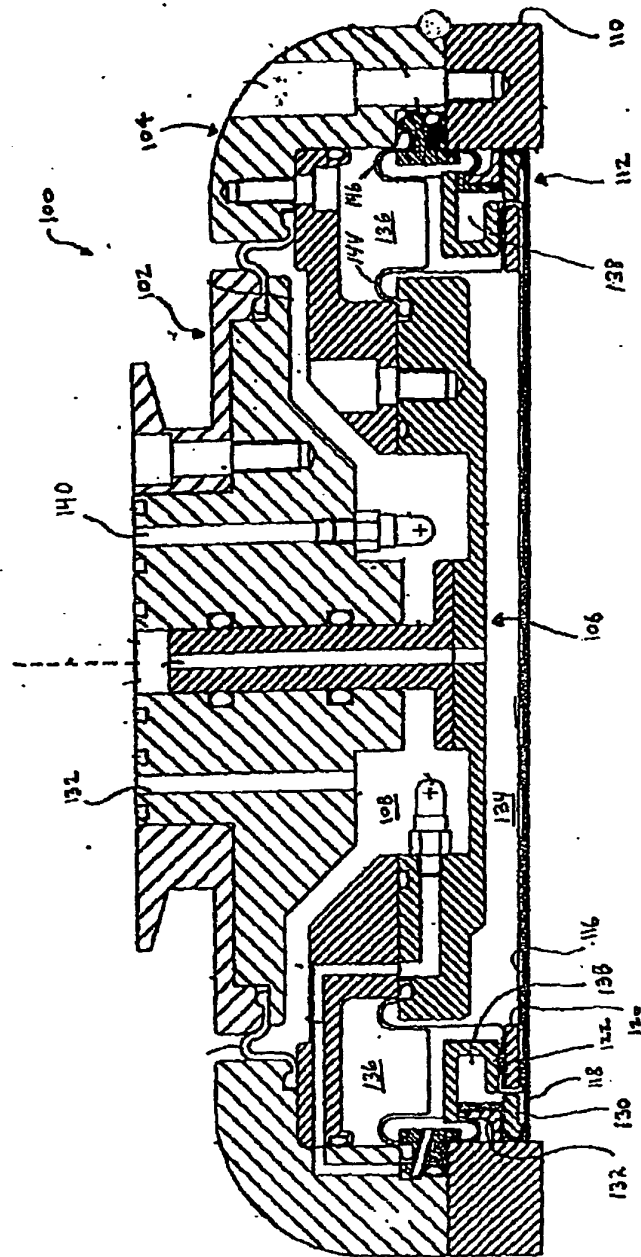


FIG. 2

FIG. 3



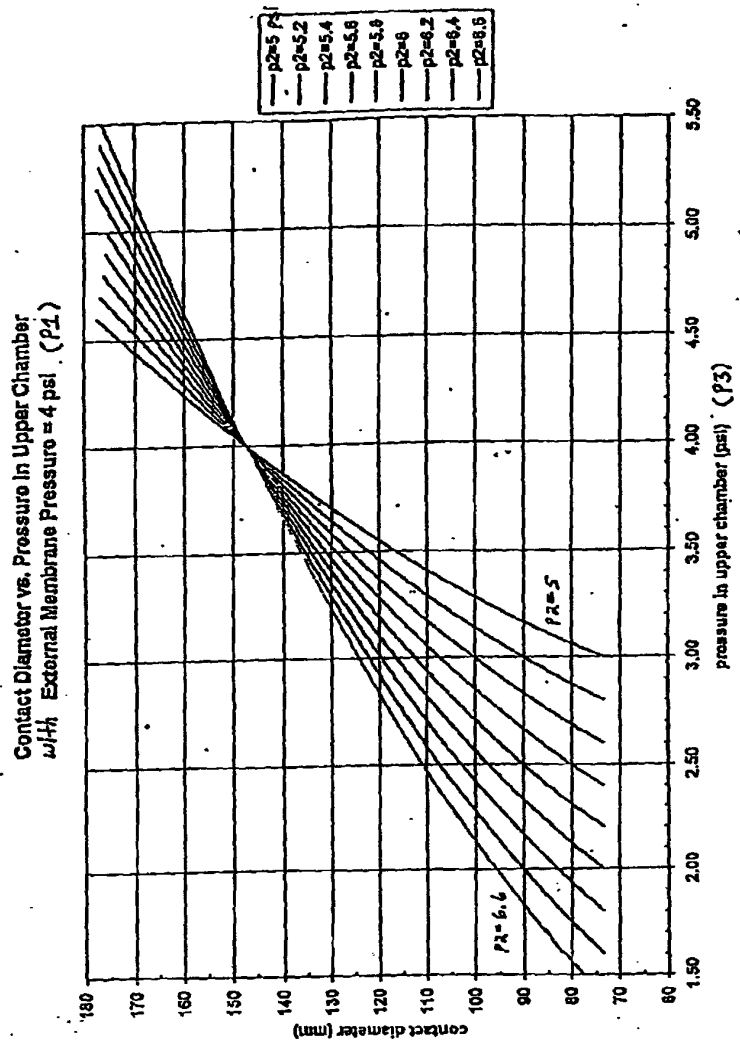


FIG. 4

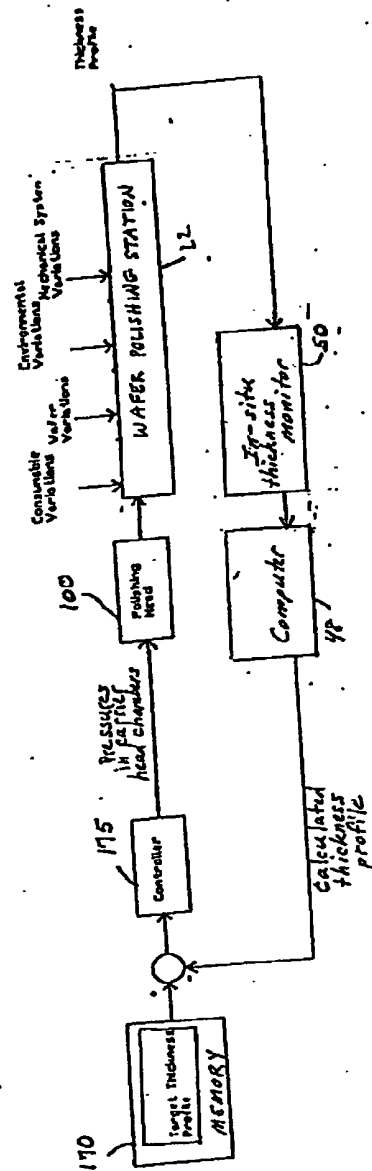


FIG. 5

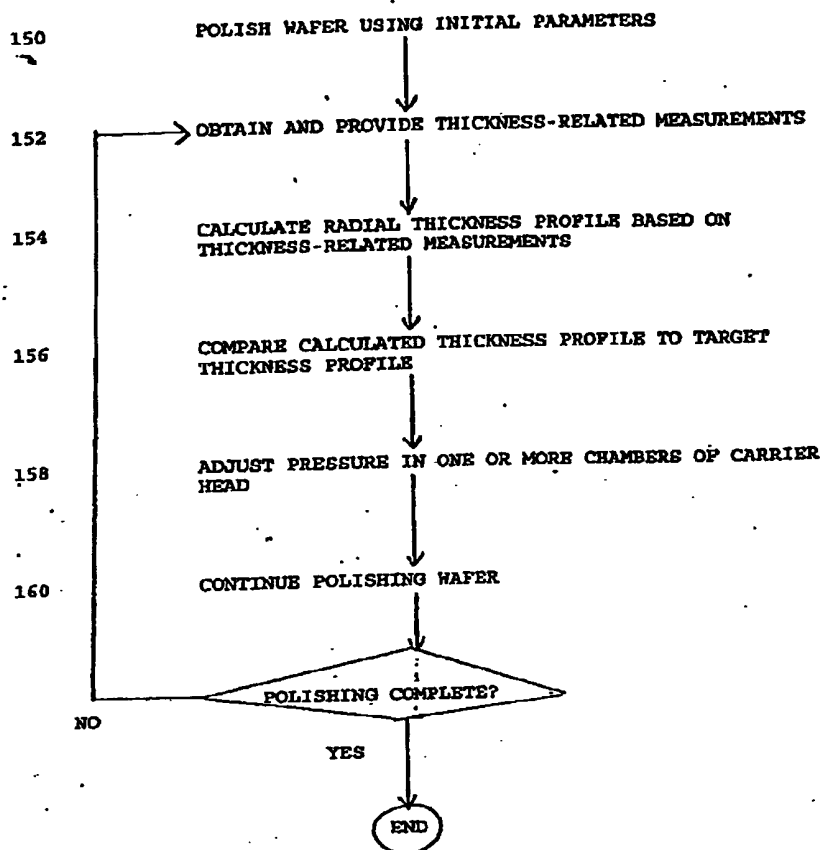
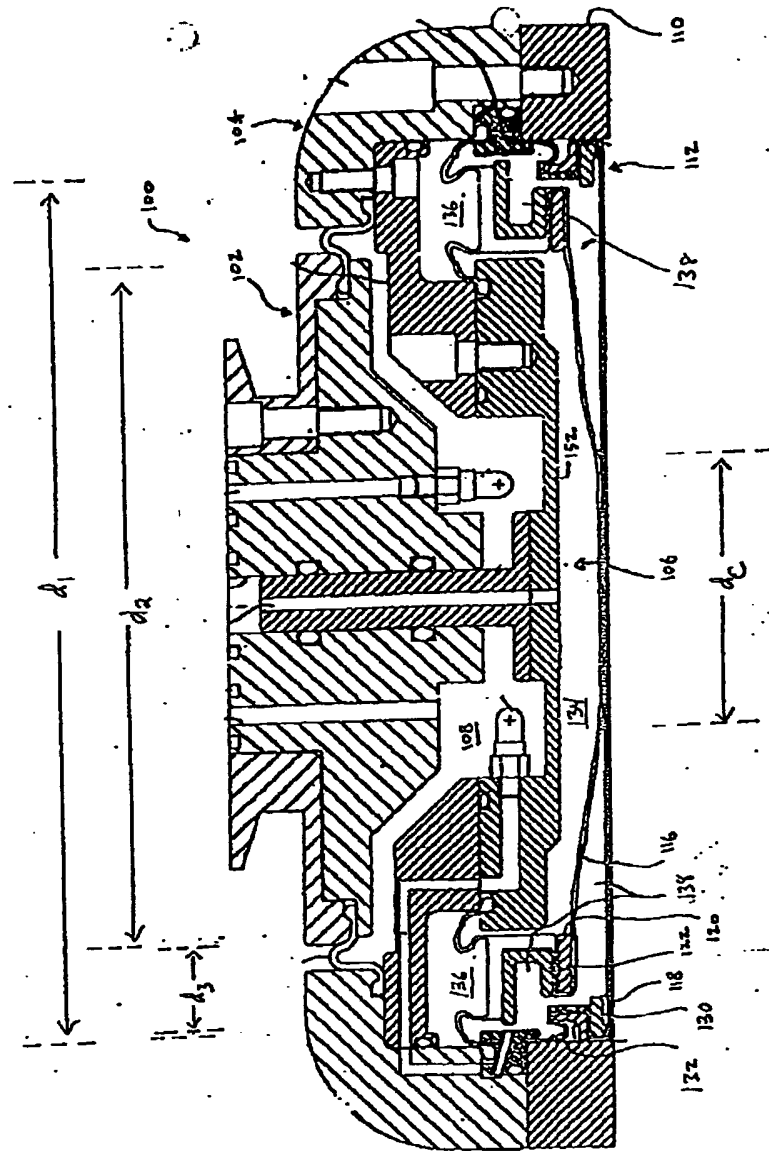


FIG. 6

FIG. 7



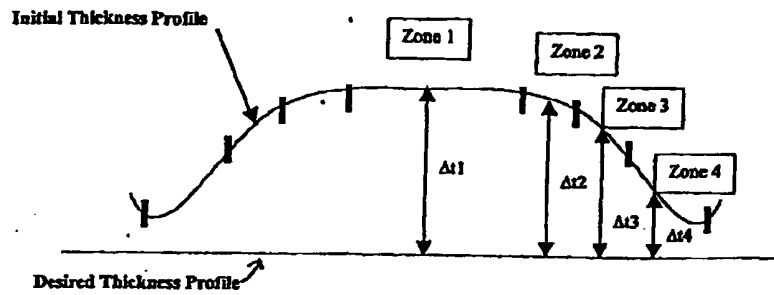


FIG. 8

1 Abstract

Techniques for polishing a wafer (10) include closed-loop control. The wafer can be held by a carrier head (100) having at least one chamber whose pressure is controlled to apply a downward force on the wafer. Thickness-related measurements of the wafer can be obtained during polishing and a thickness profile for the wafer is calculated based on the thickness-related measurements. The calculated thickness profile is compared to a target thickness profile. The pressure in at least one carrier head chamber is adjusted based on results of the comparison. The carrier head chamber pressures can be adjusted to control the amount of downward force applied to the wafer during polishing and/or to control the size of a loading area on the wafer against which the downward force is applied.